

# 보일러 헤더의 잔여수명 평가

—크립 균열성장 거동에 의한 해석—



윤 기 봉

한국표준과학연구원 소재특성평가센터

● 1958년생.  
● 고온파괴역학 및 응용을 전공하였으며, 크립 균열성장, 크립-피로 균열 성장, 열-기계적-피로 균열성장 등의 시험식 연구 및 유한요소 해석 등이 주요 연구분야이다.

## 1. 머리말

화력발전소 보일러 설비에서, 크립현상 때문에 발생하는 파손은 편이상 전반적 크립손상(widespread creep damage)에 의한 것과 국부적 크립손상(localized creep damage)에 의한 것으로 나눌 수 있다. 전자는 사용중 온도분포 및 응력분포가 비교적 균일한, 얇은 두께의 튜브 등에서 발생하며, 이때의 잔여수명은 재료의 크립파단(creep rupture) 실험데이터로부터 예측할 수 있다. 이와는 달리, 후자의 경우는 응력 및 온도구배(gradient)가 심한 후육부(thick section component)에서 많이 발생된다. 이때는 열응력 또는 산화 등에 의해 취약부에 균열이 형성되고, 이 균열이 크립조건에서 진전되어 최종파단에 이르게 된다. 따라서 후육부에 균열이 존재하는 경우의(실제로 고온 후육부에서는 사용초기부터 균열이 형성되는 경우가 많다.) 잔여수명은 균열이 성장하여 불안정 파괴가 발생하거나 또는 불안정 파괴전에 누수현상이 생길 때까지의 시간으로 정해진다. 그러므로 고온에서 정하중 또는 동하중에 의한 균열성장속도의 정확한 예측이 잔여수명 평가에 매우 중요하다. 상온에서 탄성 또는 소성변형거동을 갖는 재료의 균열성장 속도를 예측하는 방법은 잘 알려져 있으나, 크립변형을 수반

하는 고온 탄성, 소성 재료에 대해서는 균열성장 속도를 예측하는 모델 및 이와 관련된 고온 파괴역학(TDFM: time-dependent fracture mechanics)은 현재 연구 정립단계에 있다.

이 글에서는 보일러 후육부 설비중 최근 잔여수명평가의 필요성이 대두되고 있는 헤더(header)에 균열이 있는 경우 정하중 조건에서 잔여수명을 평가하는 과정 및 기초 이론을 개괄적으로 설명하였다.

## 2. 헤더의 파손

헤더에서 균열을 발생시키는 손상기구 및 실제 발전소에서의 파손양상을 조사하기 위해 1984년 미국 EPRI에서 62기의 미국내 발전소를 대상으로 헤더파손에 대하여 설문조사를 실시하였으며,<sup>(1,2)</sup> 결과를 표 1 및 그림 1에 요약하였

표 1 헤더에서의 균열발생 부위

균열의 위치	비율(%)
튜브-헤더 용접부(튜브측)	40
튜브-헤더 용접부(헤더측)	34
튜브사이의 헤더부(외표면)	11
튜브사이의 헤더부(내표면)	10
맞대기 용접부	3
길이방향 이음매 용접부	3
기 타	10

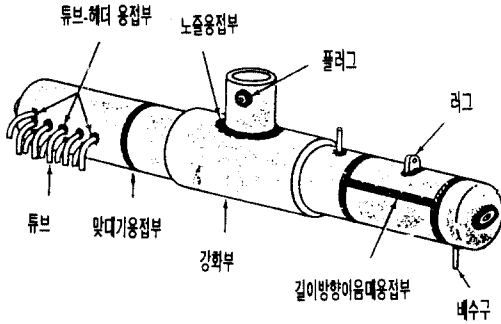


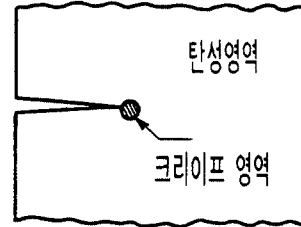
그림 1 전형적인 헤더 균열부위 (검은부분)

다. 대부분의 균열이 튜브와 헤더의 연결부에서 발견되었으며, 이 부분의 손상형태 검사결과 크립 기공화현상(creep cavitation)이 많이 관찰되었다. 따라서 헤더의 잔여수명을 예측하기 위해서는 크립변형을 수반하는 경우에 균열이 성장하는 속도, 즉 크립 균열 성장(CCG : creep crack growth) 속도를 올바르게 예측할 수 있어야 한다.

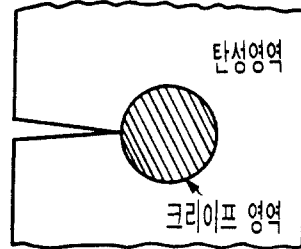
### 3. 크립 균열성장 특성화에 사용되는 파괴 매개변수

크립 균열성장의 경우에는 균열선단에서의 응력-변형률장이 시간에 따라 변화하고, 탄성변형에 비해 크립변형이 우세하므로, 응력확대계수(K)나 J-적분 등은 적절한 파괴 매개변수(parameter)라 할 수 없다. 크립 조건에서 파괴 매개변수로 제안된 것은  $C^*$ <sup>(3,4)</sup>,  $C(t)$ ,  $C_i$ ,  $C_f$ <sup>(5)</sup>,  $\delta_t$ <sup>(6)</sup>,  $C_{exp}^*$ <sup>(7)</sup>,  $Q^*$ <sup>(8)</sup>,  $J_{ex}^*$ <sup>(9)</sup>,  $J_{ex}^*$ <sup>(9)</sup>,  $\dot{T}^*$ <sup>(10)</sup> 등 다양하나, 이중 자주 인용되는  $C^*$ ,  $C(t)$  및  $C_i$  등에 대해서만 설명하기로 하자. 또한 재료의 크립 거동은 2차 크립(secondary creep)으로 가정하여, 1차 크립 및 3차 크립의 영향은 무시한 경우만 생각한다. 크립변형이 없을 때(즉, 하중을 가한 직후)의 재료거동도 탄성으로 제한하여 소성변형은 무시하기로 한다.

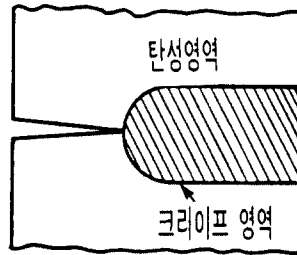
그림 2는 이러한 재료에서 하중유지시간에



(a) SSC (small scale creep) 조건



(b) TC (transition creep) 조건



(c) EC (extensive creep) 조건

그림 2 탄성-2차크립 거동 재료에서의 균열선단 크립 조건의 변화

따른 균열선단 조건의 변화를 도식적으로 보여주는 것이다. 빗금친 부분은 크립영역(creep zone)으로서 크립변형량이 탄성변형량보다 큰 부분을 나타낸다. 하중을 가한 직후에는 그림 2(a)에 보인 것과 같이 크립영역이 균열선단 부근에 작게 형성되어 있으며, 이를 SSC조건(small scale creep condition)이라 부른다. 이후 일정시간이 경과되며 크립영역이 그림 2(c)에서와 같이 균열선단에서부터 구조물 전체로 확장되고, 이를 EC조건(extensine creep condition)이라 칭한다. SSC조건에서 EC조건으로

변하는 과정을 TC조건(transition creep condition)이라 한다. SSC조건 및 TC조건을 천이크립조건(transient creep condition)이라 하며 이 때는 균열선단에서 응력장이 시간에 따라 변하게 된다. 반면에 EC조건에서는 균열선단 응력장이 시간에 따라 변하지 않고 일정하며 이 때문에 EC조건을 정상상태 크립조건(steady state creep condition)이라고도 부른다. 천이크립 조건 및 정상상태 크립조건에서 사용되는 파괴 매개변수는 다음과 같다.

### 3.1 C\*-적분

정상상태 크립조건에서는 크립변형이 탄성변형에 비해 매우 우세하고, 크립변형도 2차크립 변형만 존재한다. 따라서 균열선단 부근의 모든 재료가 식 (1)의 크립법칙에 의해 지배된다고 볼 수 있다.

$$\dot{\epsilon} = \dot{\epsilon}_c = A \cdot \sigma^n \quad (1)$$

이식에서  $\dot{\epsilon}$ 는 전체 변형률속도,  $\dot{\epsilon}_c$ 는 크립변형에 의한 변형률속도,  $\sigma$ 는 응력, A 및 n은 재료의 크립 상수이다. 식 (1)과 재료의 지수 법칙(power law)에 따른 소성법칙,  $\epsilon_p = D\sigma^m$  (여기서,  $\epsilon_p$ 는 소성변형률, D와 m은 재료의 소성 상수이다.)의 유사성으로부터 J-적분과 유사한 경로적분 C\*-적분이 다음과 같이 정의되며,<sup>(3,4)</sup> 정상상태 크립조건에 있는 균열체의 크립균열성장 속도는 아래식의 C\*에 의해 지배된다.<sup>(3,4,11,12)</sup>

$$C^* = \int_r W_s^* dy - T_i \left( \frac{\partial \dot{u}_i}{\partial x} \right) ds \quad (2)$$

이 식에서  $W_s^*$ 는 다음식으로 정의되는 응력 일률(stress working power)이다.

$$W_s^* = \int_0^{\epsilon_m} \sigma_{ij} d\dot{\epsilon}_{ij} \quad (3)$$

식 (2), (3)에서  $\sigma_{ij}$ 는 응력텐서,  $\dot{\epsilon}_{ij}$ 는 변형률 속도 텐서이며,  $\Gamma, T_i, x, y, s$ 는 J적분에서 정의된 것과 같다.

C\*는 또한 균열 길이가 약간 다른 두 개의

균열체가 동일한 하중을 받을 때의 일률(power)의 차이를 나타내기도 한다. 즉, 아래식으로도 C\*를 정의할 수 있다.

$$C^* = -\frac{1}{B} \frac{dU^*}{da} \quad (4)$$

정상상태 크립조건에서는 식 (2)로 계산된 C\*값과 식 (4)의 C\* 값은 동일하다. 식 (4)에서 U\*는 균열체로 공급된 일률이며, B는 균열체의 두께를 나타낸다.

정상상태 크립조건에서 균열선단 부근의 응력-변형률장은 다음과 같이 표시된다.<sup>(13)</sup>

$$\sigma_{ij} = \left( \frac{C^*}{AI_n} \right)^{1/(n+1)} r^{1/(n+1)} \bar{\sigma}_{ij}(\theta, n) \quad (5)$$

$$\dot{\epsilon}_{ij} = \left( \frac{C^*}{AI_n} \right)^{1/(n+1)} r^{1/(n+1)} \bar{\epsilon}_{ij}(\theta, n) \quad (6)$$

이 식에서 r은 균열선단으로부터의 거리,  $\theta$ 는 균열면으로부터의 각도,  $\sigma_{ij}(\theta, n)$ 와  $\bar{\epsilon}_{ij}(\theta, n)$ 는 무차원함수<sup>(14)</sup>이며,  $I_n$ 은 n에 따른 상수<sup>(14)</sup>이다. 식 (5), (6)에서 알 수 있듯이 정상상태 크립조건에서 C\*는 균열선단 특이응력장(singular stress field, 보통 HRR(hutchinson-rice-rosengren) 특이응력장이라 부른다.)의 세기(intensity)를 나타낸다. 재료의  $\sigma$ - $\dot{\epsilon}$  관계를 나타내는 식 (1)에 보인대로  $\dot{\epsilon}$ 는  $\sigma$ 의 유일함수(unique function)이므로 식 (2)로 정의된 C\*적분값은 J-적분의 경우와 마찬가지로 적분경로와 관계없이 일정한 값을 갖는다. 이상의 이유 때문에 C\*는 정상상태 크립조건에서 크립균열성장 속도를 특성화(characterize)할 수 있는 좋은 파괴 매개변수가 된다.

### 3.2 C(t)-적분

천이크립조건에서는 변형률속도는 응력뿐 아니라 응력속도  $\dot{\sigma}$ 의 함수 즉, 시간의 함수이기도 하다. 응력의 변화는 크립 영역의 크기가 시간에 따라 커지게 되어 크립 영역 주변의 탄성응력이 재분포되기 때문에 발생한다. 따라서, 응력-변형률속도 관계는 다음과 같이 표시

된다.

$$\dot{\epsilon} = \dot{\epsilon}_e + \dot{\epsilon}_c = \frac{\dot{\sigma}}{E} + A \sigma^n \quad (7)$$

여기서,  $\dot{\epsilon}_e$ 는 응력재분포에 따른 탄성변형률 속도이다. 식 (7)에서 보듯이 천이크립조건에서  $\dot{\epsilon}$ 는 더 이상  $\sigma$ 의 유일함수가 아니므로, 식 (2)에 정의된  $C^*$  적분값도 적분경로에 따라 변하게 되며, 적분경로가 일정한 경우에도 시간이 경과함에 따라  $C^*$ 적분값이 변하게 된다.

그러나 크립상수  $n$ 이 1보다 큰 경우에는(일반적으로 고온용금속 재료의  $n$ 값은 4~6이다.), 하중을 가한 후에 균열선단부에  $\dot{\epsilon}_c$ 가  $\dot{\epsilon}_e$ 보다 우세한 영역이 형성되므로, 이 영역내에서만 적분경로를 선택하면 경로에 상관없이 적분값이 일정하게 된다. 이와 같은 균열선단에서의 적분을  $C(t)$ -적분이라 부르고 다음식으로 정의한다.<sup>(15)</sup>

$$C(t) = \int_{r_c} W_s^* dy - T_i \left( \frac{\dot{\partial} u_i}{\partial x} \right) ds \quad (8)$$

이식에서  $\Gamma_c$ 는 균열선단부근의 매우 작은 적분경로이다. 식 (7)의 변형거동을 보이는 재료의 균열선단부근에서 응력장은<sup>(16,17)</sup> 식 (9)로 표시된다.

$$\sigma_{ij} = \left( \frac{C(t)}{I_s A r} \right)^{1/(n+1)} \bar{\sigma}_{ij}(\theta, n) \quad (9)$$

그러므로  $C(t)$  적분값은 천이크립에서 정상상태 크립  $C^*$ 처럼 HRR 특이 응력장의 세기를 나타낸다.  $C^*$ 의 정의식인 식 (2)와  $C(t)$ 의 정의식인 식 (8)을 비교해 보면, 크립 영역이 성장하여 SSC 조건에서 EC 조건으로 균열선단 크립조건이 변화함에 따라  $C(t)$  값은  $C^*$  값에 접근하게 됨을 쉽게 알 수 있다. 따라서  $C(t)$ 적분은 천이크립조건 및 정상상태크립조건을 포함하는 전 크립영역에서 균열선단 특이 응력장의 세기를 나타내므로, 크립균열성장 속도를 특성화하는 양호한 파괴 매개변수가 될 수 있을 것이다. 그러나  $C(t)$  값을 평가하기 위해서는 균열선단 부근의 적분경로에서 자세

한 응력-변형률속도에 대한 정보가 필요하다. 이는 유한요소 해석 등을 통해서만 확보가 가능하고 실험적으로는 측정이 매우 어렵다. 따라서 이러한 단점 때문에  $C(t)$ 의 실질적 사용에는 한계가 있다.

### 3.3 $C_t$ -매개변수

앞서 설명한  $C(t)$  적분은 정상상태 크립조건인  $C^*$ 를 경로적분 정의식인 식 (2)를 통해 천이크립조건으로 확장한 것이다. 반면에  $C^*$ 를 일률의 차이 정의식인 식 (4)를 통해 천이크립조건인 경우로 확장한 것이  $C_t$ -매개변수라 할 수 있다.<sup>(18)</sup>  $C_t$ -매개변수는 다음식으로 정의된다.

$$C_t = -\frac{1}{B} \frac{\partial U_t^*}{\partial a} \quad (10)$$

$C^*$ 정의식에서의  $U^*$ 는 정상상태 크립조건에서의 일률로서 시간이 경과되어도 그 값이 일정하지만, 위식에서 나타난  $U_t^*$ 는 순간적인 일률로서 천이크립조건에서 시간이 경과됨에 따라 그 값이 변한다. SSC 조건에서 EC 조건으로 진행됨에 따라  $U_t^*$ 는  $U^*$ 값에 접근하므로  $C_t$ 값도 정상상태 조건에서는  $C^*$ 값과 동일하게 된다. 즉 정상상태 크립조건에서  $C^* = C(t) = C_t$ 가 된다. 그러나 천이크립조건에서는  $C_t$ 값을 균열선단 특이 응력장의 세기와 무관하므로  $C(t)$ 값과 서로 상이하다.  $C_t$ 값은 특이응력장의 세기를 나타내주지는 못하지만 다음과 같이 실험적 방법으로 측정이 가능하다는 장점이 있다.<sup>(18)</sup>

먼저 동일한 형상을 갖는 몇 쌍의 시편을 준비한다. 각 쌍의 시편중 한 개는 균열길이가,  $a$ , 다른 한개는 균열길이가  $a + \Delta a$ 가 되도록 한다. 각 쌍의 시편들에 고온에서 서로 다른 크기의 하중( $P_1, P_2, P_3 \dots$  등)을 가한 후에, 시간의 경과에 따른 하중점 변위의 증가량(load-line deflection)을 측정한다. 시간에 따라 하중점변위가 증가하는 것은 크립변형 때문이며, 이를  $V_c$ 로 표시하여 그림 3(a)에 나타내었다.

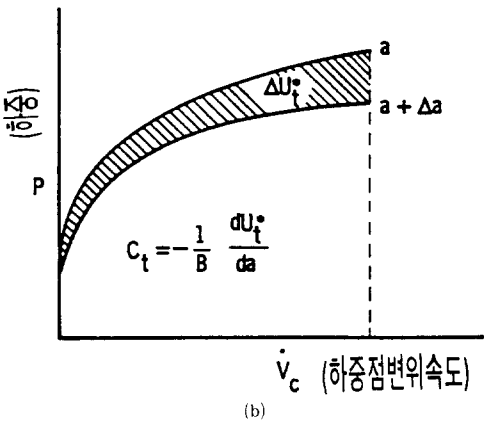
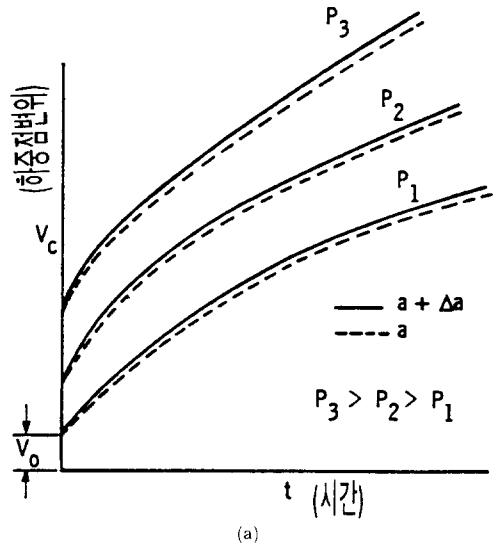


그림 3 (a). 하중크기가 각각  $P_1, P_2, P_3$ 일 때 균열길이  $a$ 인 시편과  $a+\Delta a$ 인 시편에서의 시간에 따른 하중점 변위 ( $V_c$ )의 변화.  
(b).  $C_t$ 값의 측정

이 때 균열은 성장하지 않는다고 가정한다. 그림 3(a)에서 임의의 시간  $t$ 의 하중점변위속도  $\dot{V}_c$ 를 측정하여 이를  $p$ 의 함수로 표시하면 그림 3(b)에 보인 바와 같이 된다. 그림 3(b)에서 균열길이  $a$ 인 균열체의  $P-\dot{V}_c$  곡선과 균열길이  $a+\Delta a$ 인 균열체의  $P-\dot{V}_c$  곡선 사이의 면적을  $\Delta U_t^*$ 로 표시하면(첨자  $t$ 는  $\Delta U_t^*$ 가 시간의 함수임을 나타낸다.),  $C_t$ -매개 변수는 다음식으로 측정될 수 있다.

$$C_t = \lim \left( -\frac{1}{B} \frac{\Delta U_t^*}{\Delta a} \right) = -\frac{1}{B} \frac{\partial U_t^*}{\partial a} \quad (11)$$

정상상태크립 조건이 되면  $\Delta U_t^*$ 는 정상상태 값인  $\Delta U^*$ 가 되므로,  $C_t \equiv C^*$ 가 된다.  $C_t$ 매개 변수가 균열선단 응력장과 어떤 관련이 있는지는 아직 잘 알려지지 않았지만, SSC조건에서는 균열선단 크립 영역의 팽창속도(creep zone expansion rate)를 나타낸다고 알려져 있다.<sup>(18)</sup> 앞서 설명한대로 천이크립조건에서는  $C_t$ 값과  $C(t)$  값은 서로 다르므로,  $C_t$ 와  $C(t)$  중 한 가지만이 크립균열성장 속도를 특성화하는 매개변수로 선택될 수 있다. 많은 실험결과로부터<sup>(18-21)</sup>  $C_t$ 가  $C(t)$ 보다 더 좋은 크립 균열성장 특성화용 매개변수임이 관찰되었다. 따라서, 이 글에서는  $C_t$  매개변수를 사용한 수명 평가법에 대해서만 설명한다.

#### 4. 헤더용 Cr-Mo강의 크립 특성 데이터

발전소 보일러 헤더 제작에 가장 많이 사용

표 2 Cr-Mo강의 화학성분

재료	성분	Sb	C	Cr	Mn	Mo	Ni	P	Si	S
<b>2.25Cr-1Mo</b>										
사용재(20)		0.003	0.12	2.1	0.4	1.1	0.16	0.08	0.28	0.015
신 재(20)		0.008	0.10	2.2	0.46	0.97	0.07	0.01	0.26	0.012
신 재(23)		—	0.12	2.22	0.39	1.0	—	0.013	0.26	0.006
<b>1.25Cr-0.5Mo</b>										
사용재(22)		—	0.10	1.19	0.45	0.61	—	—	0.63	0.013

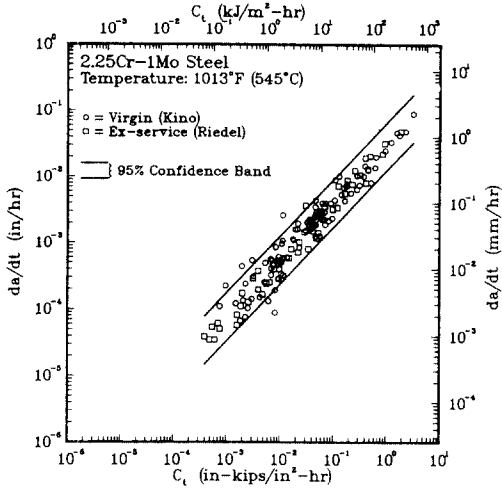


그림 5 1.25Cr-0.5Mo강의 크립 균열성장거동

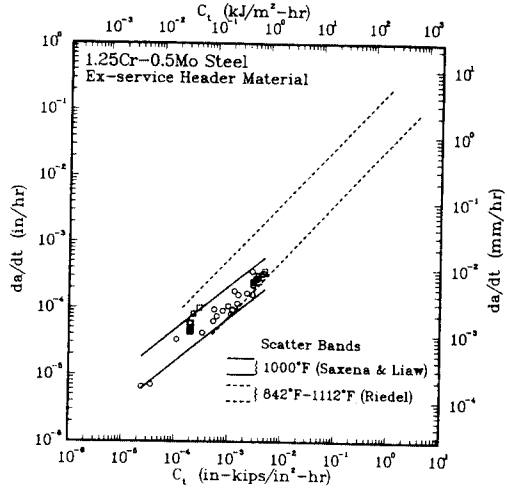


그림 4 2.25Cr-1Mo강의 크립 균열성장거동

되는 재료는 Cr-Mo강(2.25Cr-1Mo강, 1.25Cr-0.5Mo강)이므로, 헤더의 잔여수명평가를 위해서는 이들 재료의 크립 균열성장속도 데이터가 필요하다. 또한  $C_t$  값 계산을 위해, 기본적으로 인장특성 데이터 및 크립 특성 데이터가 요구된다. 문헌에 발표된<sup>(19,20,22,23)</sup> 2.25Cr-1Mo강, 1.25Cr-0.5Mo강의 화학성분, 인장특성 및 크립 특성을 표 2~표 4에 각각 정리하였다.<sup>(19)</sup> 크립 균열성장 속도는  $C_t$ -매개변수로 특성화하였으며, 결과를 2.25Cr-1Mo강의 경우 그림 4에 1.25Cr-0.5Mo강의 경우 그림 5에 정리하였다. 크립 균열성장속도 측정법 및  $C_t$  측정법은 최근 ASTM에 의해 규격화되었다.<sup>(24)</sup> 그림 4, 5의 결과를 종합하고, Cr-Mo-V강의 크립 균열성장 속도 데이터도 함께 정리한 것이 그림 6이다. 이 그림에는 95% 신뢰구간도 표시하였으며, 신뢰구간의 상한선(upper scatter band)을 식으로 나타내면 다음과 같다.

$$\frac{da}{dt} = 3.73 \times 10^{-2} C_t^{0.805} \quad (12)$$

또한, 평균값을 식으로 나타내면 다음과 같다.

$$\frac{da}{dt} = 8.74 \times 10^{-3} C_t^{0.805} \quad (13)$$

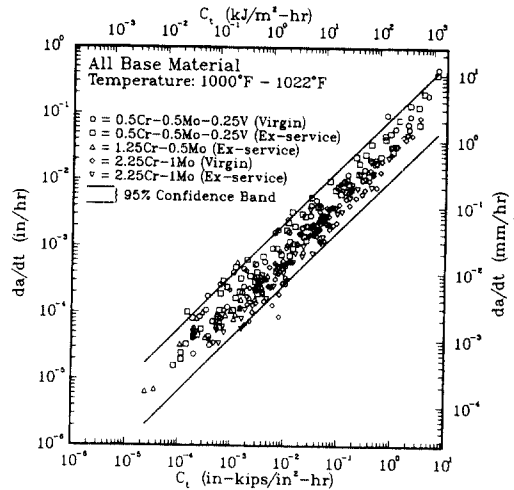


그림 6 Cr-Mo-V강의 크립 균열성장거동

Cr-Mo강의 평균적인 크립 균열성장속도를 알아보기 위해서는 식 (13)을 사용하지만, Cr-Mo강의 구조물에서 크립 균열성장에 의한 수명평가를 위해서는 안전율을 고려하여, 식 (12)를 사용하는 것이 좋다.

### 5. 구조물에서의 $C_t$ 평가법

SSC 조건에서  $C_t$  평가식은  $C_t$ 의 정의식, 식

(10)으로부터 다음과 같이 유도되었다.<sup>(22)</sup>

$$C_t = \frac{P\dot{V}_c F'}{BW F} \quad (14)$$

식 (14)에서 크립에 의한 하중점 변위속도는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\dot{V}_c = \frac{2B(1-\nu^2)}{EP} K^2 \beta \dot{\gamma}_c(\theta=90^\circ\text{C}, n) \quad (15)$$

여기서,  $\dot{V}_c$ 는 크립에 의한 하중점 변위속도이며,  $P$ 는 하중,  $W$ 는 시편너비,  $F, F'$ 는 응력 확대계수를 위한 기하학적 함수,  $K$ 는 응력 확대계수,  $\beta$ 는 수치해석을 통해, 얻은 상수(=3)이며,<sup>(15,26)</sup>  $\dot{\gamma}_c$ 는 다음과 같이 표현된다.<sup>(16)</sup>

$$\dot{\gamma}_c(\theta, t) = \frac{2\alpha}{n-1} K^2 t^{-(n-3)/(n-1)} (EA)^{2/(n-1)} \tilde{\gamma}_c(\theta, n) \quad (16)$$

여기서,  $\alpha$ 는  $n$ 에 의해 정해지는 상수이다.<sup>(16)</sup> 식 (16)과 식 (15)를 식 (14)에 대입하여 다음과 같이 SSC에서의  $C_t$  평가식이 유도된다.

$$(C_t)_{SSC} = \frac{4\alpha\beta\tilde{\gamma}_c(\theta, n)}{E(n-1)} (1-\nu^2) \frac{K^4 F'}{W F} (EA)^{2/(n-1)} t^{-(n-3)} t^{-(n-3)/(n-1)} \quad (17)$$

여기서,  $\beta\tilde{\gamma}_c(\theta, n)$  값은 대략 1/7.5이다. 식 (17)로 표현되는  $(C_t)_{SSC}$ 는 재료가 탄성-2차크립 거동을 보일 때만 적용된다. 재료거동에 1차크립거동 또는 소성변형거동 등이 포함되면 식 (16)은 수정되어야 한다.<sup>(16)</sup> 하지만 식 (14), (15)는 SSC 조건에서는 어떤 경우에도 적용되는 일반식이다.

정상상태크립 조건에서  $C_t$ 는  $C^*$ 와 같으므로,  $J$ -핸드북<sup>(27)</sup>의 해를 이용해서 쉽게  $C^*$ 식을 유도할 수 있다. 예로서, 평면변형률(plane strain) 조건의  $C(T)$  시편인 경우  $C^*$ 식은 다음과 같이 표현된다.

$$C^* = \frac{A}{(W-a)^n} h_1 \left( \frac{a}{W}, n \right) \left( \frac{p}{1.455\xi B} \right)^{n+1} \quad (18)$$

단,  $\xi$ 는 식 (19)로 나타낼 수 있다.

$$\xi = \left[ \left( \frac{2a}{W-a} \right)^2 + 2 \left( \frac{2a}{W-a} \right) + 2 \right]^{1/2}$$

$$-\left( \frac{2a}{W-a} \right) - 1 \quad (19)$$

여기서,  $h$ 는 기하학적 함수이다.

천이크립 조건에서  $C_t$ 는 다음과 같이 SSC 조건에서의  $C_t$ 와 정상상태크립 조건에서의  $C^*$ 의 합으로 표시된다.

$$C_t = (C_t)_{SSC} + C^* \quad (20)$$

따라서, 전크립 영역에서의  $C_t$ 값은 근사적으로 다음과 같이 표현된다.

$$C_t = \frac{4\alpha\beta\tilde{\gamma}_c(\theta, n)}{E(n-1)} (1-\nu^2) \frac{K^4}{W} \frac{F'}{F} (EA)^{2/(n-1)} t^{-(n-3)/n-1} + C^* \quad (21)$$

이식을 이용하면 재료의 크립 특성 데이터, 구조물의 형상, 하중 및 균열형상 등으로부터 구조물에서의  $C_t$ 값을 평가할 수 있다.

## 6. 잔여수명 평가과정

앞에서 설명한 재료의 크립 특성데이터(즉, 크립 변형거동 및 크립 균열성장거동)와 구조물에서의  $C_t$  평가식을 사용하여, 균열을 갖는 후속부가 고온에서 정하중을 받을 때 잔여수명을 계산하는 과정을 살펴보자. 그림 7은 잔여수명 평가과정의 여러 단계를 도식적으로 나타낸 것이다. 제1단계는 재료의 크립특성을 알아내는 것이다. 대상재료를 사용하여 크립파단시험과 크립균열성장 시험을 행하여, 재료상수인  $A, n, b, q$  등을 측정한다. 제2단계에서는 구조물의 형상, 균열의 형상 및 하중조건 등으로 부하상태에서의  $C_t$  평가식을 유도한다. 제3단계에서는 제1단계, 제2단계 결과로부터 잔여수명 곡선을 결정한다. 잔여수명곡선에서는 그림 9와 같이 잔여수명을 초기균열의 함수로 나타내거나 또는 그림 10과 같이 초기균열크기는 정해놓고 성장된 균열크기를 시간의 함수로 나타낸다. 이상의 단계를 자세히 알아보기 위해 다음 예를 들어본다.

예) 길이 방향의 균열을 가진, 두께가 두꺼

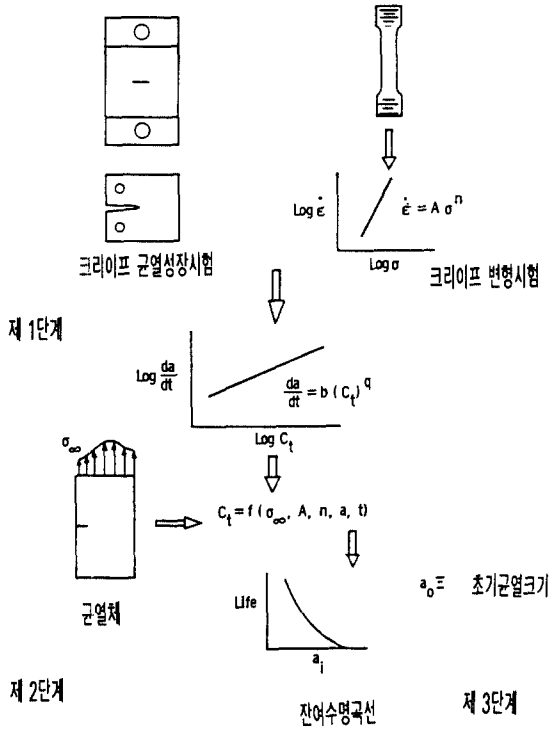


그림 7 크립 균열성장예에 의한 잔여수명 평가과정

운 내압 실린더에서의 수명평가

그림 8에 보인 내압용기에서, 내경( $R_i$ )은 381mm, 외경( $R_o$ )은 457.2mm이며, 두께는 76.2mm이다. 내압은 13.79MPa이며, 사용온도는 538°C, 사용재료는 1.25Cr-0.5Mo강 사용재이다. 본 예는 실제 보일러 헤더 균열이 있는 경우와 매우 유사하다.

잔여수명평가 과정을 단계별로 살펴보자.

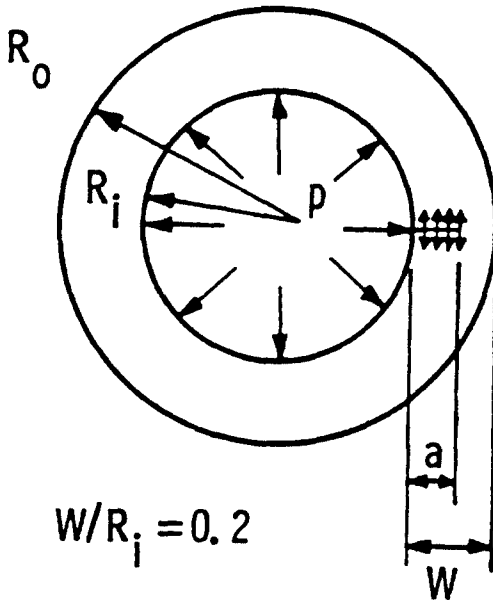


그림 8 균열을 가진 두꺼운 내압실린더

(1) 제1단계 : 재료특성평가

1.25Cr-0.5Mo 사용재의 538°C에서의 인장 및 크립특성중  $\sigma_{ys}$ ,  $m$ ,  $D$ 는 표 3에,  $A$ ,  $n$ 은 표 4에 요약되어 있으며, 크립균열성장 특성은 다음 식으로 표시된다.

$$\frac{da}{dt} = 5.94 \times 10^{-5} (C_t)^{0.751} \quad (22)$$

이 식은,  $da/dt$ 는 mm/hr,  $C_t$ 는 Joule/m<sup>2</sup>. hr의 단위를 사용한 경우이다.

(2) 제2단계 :  $C_t$  평가식의 유도

$C_t$  평가식은 식 (21)을 사용한다.  $n=10.1$

표 3 Cr-Mo강의 인장특성

인장특성 재료	온도(°C)	$\sigma_{ys}0.2\%$ (MPa)	UTS (MPa)	%Elong	%R.A	D. (Mpa <sup>-m</sup> )	m
2.25Cr-1Mo 신 재 (23)	550	326	384	32.8	88.2	—	—
1.25Cr-0.5Mo 사용재 (22)	538	131	223	49.0	84.8	$8.36 \times 10^{-15}$	5.4
사용재 (22)	482	135.1	279.9	39.8	78.8	$2.2 \times 10^{-14}$	5.1



표 4 Cr-Mo강의 크립특성

재 료	크립특성	사용응력범위 (MPa)	시험온도 (°C)	A (Ksi <sup>-n</sup> hr <sup>-1</sup> )	n
2.25Cr-1Mo	사용재 <sup>(20)</sup>	—	540	6.89×10 <sup>-14</sup>	6.6
	신 재 <sup>(23)</sup>	8-20	550	1.34×10 <sup>-15</sup>	7.79
1.25Cr-0.5Mo	사용재 <sup>(20)</sup>	7-20	538	4.3×10 <sup>-16</sup>	10.1

주) A, n은 크립 상수,  $\epsilon = A \cdot \sigma^{-n}$

이므로  $\alpha=0.259$ 이며,<sup>(16)</sup>  $\nu=0.3$ , W는 벽두께인 76.2mm이다. 식 (21)의 첫째항에 필요한 응력확대계수 K의 표현식을 찾아보자. W/R<sub>1</sub>가 0.2이고,  $0 \leq a/W \leq 0.5$ 인 조건에서 응력확대계수식을 핸드북 등<sup>(28)</sup>에서 찾으면 식 (23)과 같다.

$$K = p\sqrt{WF} \left( \frac{a}{W} \right) \quad (23)$$

이 때 p는 내압이며, 함수 F(a/W)는 식 (24)와 같다.

$$F \left( \frac{a}{W} \right) = 11.6\sqrt{a/W} [0.95 + 1.301(a/W) + 10.66(a/W)^2 - 55.02 \left( \frac{a}{W} \right)^3 + 75.56 \left( \frac{a}{W} \right)^4] \quad (24)$$

그리고 F(a/W)는 식 (25)와 같다.

$$F' \left( \frac{a}{W} \right) = \frac{dF}{d(a/W)} \quad (25)$$

식 (21)의 둘째항인 C\*의 평가식도 실린더와 균열현상을 고려하여 J-핸드북<sup>(27)</sup>에서 다음식으로 선택할 수 있다.

$$C^* = A \left( 1 - \frac{a}{W} \right) a \cdot h_1 \left( \frac{\sqrt{3}}{2} P \frac{R_1/W + a/W}{1 - a/W} \right)^{n+1} \quad (26)$$

이 식에서 h<sub>1</sub>은 a/W, n 및 W/R<sub>1</sub>의 함수로서 J-핸드북에서 값을 알아낼 수 있다. 식 (23)~(26)을 식 (21)에 대입하고 제1단계에서

얻은 재료상수를 대입하면 다음과 같은 C<sub>t</sub>평가식을 얻게 된다.

$$C_t = 0.157t^{-0.78} (F'F^3) + 1.0 \times 10^{-7} h_1 \left( 1 - \frac{a}{W} \right) \left( \frac{a}{W} \right) \left( \frac{5 + a/W}{1 - a/W} \right)^{11.1} \quad (27)$$

(3) 제3단계 : 수명평가(잔여수명곡선결정)  
C<sub>t</sub>의 평가식, 식 (27)을 크립균열성장 특성식, 식 (22)에 대입하면 다음과 같이 균열성장 속도를 시간과 균열길이의 함수로 얻게 된다.

$$\frac{da}{dt} = 5.94 \times 10^{-5} \left[ 0.157t^{-0.78} (F'F^3) + 1.0 \times 10^{-7} h_1 \left( 1 - \frac{a}{W} \right) \left( \frac{a}{W} \right) \left( \frac{5 + a/W}{1 - a/W} \right)^{0.751} \right] \quad (28)$$

따라서

$$\int_{t_0}^{t_f} dt = 5.94 \times 10^{-5} \left[ 0.157t^{-0.78} (F'F^3) + 1.0 \times 10^{-7} h_1 \left( 1 - \frac{a}{W} \right) \left( \frac{a}{W} \right) \left( \frac{5 + a/W}{1 - a/W} \right)^{0.751} \right] da \quad (29)$$

단, 이식에서 t<sub>f</sub>는 잔여수명, t<sub>0</sub>는 균열성장 시작전까지의 시간(incubation period), a<sub>0</sub>는 초기균열길이, a<sub>f</sub>는 최종균열길이이다. 일반적으로 a<sub>0</sub>는 비파괴검사 등으로 측정되고, a<sub>f</sub>는 파괴인성값으로부터 불안정 균열성장조건에서 예측되거나 또는 누수발생시의 균열길이로 정

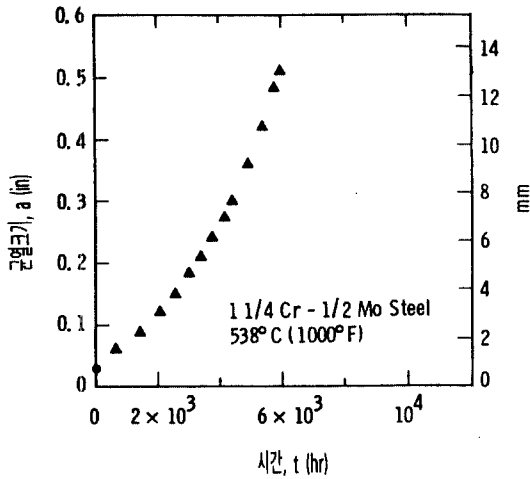


그림 9 사용시간에 따른 균열크기 곡선

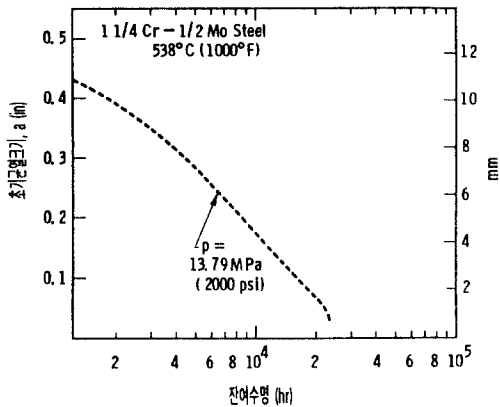


그림 10 초기균열크기에 따른 잔여수명곡선

해진다.  $t_0$ 는 재료에 따라 다르지만 보통 경험에 의해 선택된다.

본 예에서는 임의로  $a_f$ 를 13mm,  $t_0$ 를 1시간으로 선택하여 잔여수명을 평가하였으며 결과를 그림 9와 그림 10에 보였다.

### 7. 수명평가과정 개선을 위한 과제

이 글에서는 설명을 간단히 하기 위해 복잡한 경우는 고려하지 않았다. 그러나 더 정확한 헤더의 수명평가를 위해서는 다음 점들을 고려

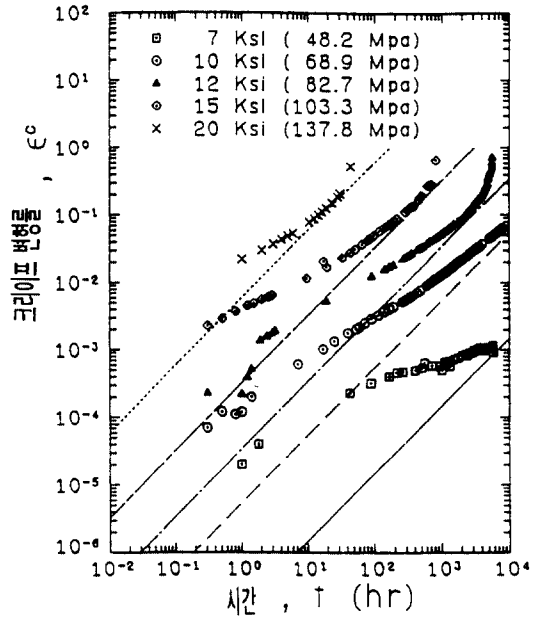


그림 11 1.25Cr-0.5Mo강의 크립 시험결과를 2차 크립으로 모델링한 경우

해야 한다.

○재료의 크립 특성을 탄성-2차 크립으로 가정하였으나 많은 경우 1차 크립(primary creep)의 영향을 무시할 수 없다. 예로서 1.25Cr-0.5Mo강의 크립 특성을 2차 크립으로 모델링한 경우와 1차 크립-2차 크립 모델링한 경우를 그림 11과 그림 12에 보였다. 이 재료에서는 1차 크립의 효과가 중요함을 알 수 있다. 이러한 경우  $C_r$ 의 평가식 (21)은 1차 크립 재료에 알맞게 수정되어야 한다.<sup>(29)</sup> 3차 크립(tertiary creep)이 중요한 경우도 마찬가지이다.

○고온에서는 재료의 항복강도가 현저히 저하되게 되므로, 균열선단에서의 소성역 형성을 무시할 수 없다. 따라서 탄성-소성-크립 변형 재료에 알맞게  $C_r$ 의 평가식을 수정하여야 한다.<sup>(30)</sup>

○이 글에서는 기지조직(matrix)에 균열이 있는 경우를 예로서 살펴 보았지만, 표 1에서 볼 수 있듯이 실제로는 용접부에 균열발생이 많

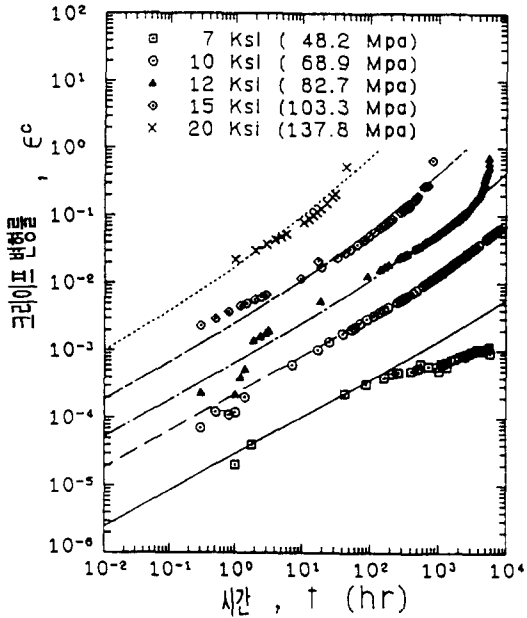


그림 12 1.25Cr-0.5Mo강의 크립 시험결과를 1차 크립-2차크립으로 모델링한 경우

으므로 용접부에서 크립 균열성장 속도를 측정하는 방법이 연구되어야 하고, 많은 실험데이터가 축적되어야 한다. 특히 용선(fusion line)에 균열이 있는 경우가 연구되어야 한다.

이 글에서는 정하중의 균열 성장에 대해서만 설명하였으나, 발전소가 기동-정지함에 따라 헤더에 피로하중이 걸리게 되므로, 이 때는 크립-피로 균열 성장 거동에 근거하여 잔여수명을 평가해야 한다.

### 8. 맺음말

균열이 형성되어 있는 설비가 고온에서 정하중을 받으면, 크립 조건에서 균열이 성장하여 파손이 발생한다. 이 때 잔여수명 평가법을 설명하기 위해 발전소 헤더의 경우를 예로 하여 잔여수명 평가절차, 이에 필요한 기초이론 및 Cr-Mo강의 관련 재료 물성 데이터 등을 설명하였다. 현재 국내발전소들이 노후화되어 잔여수명평가의 필요성이 증대되고 있으므로, 이

분야의 연구 및 기술개발은 시급하고 중요한 과제라고 생각된다.

### 참고문헌

- (1) Roberts, B.W., Ellis, F.V. and Viswanathan, R., 1985, "Utility Survey and Inspection for Life Assessment of Elevated Temperature Headers," Proceedings of American Power Conference, Chicago IL, U.S.A., pp. 295~301.
- (2) Harth, G.H., 1988, "New Superheater Outlet Header Revives Middle-Aged Boilers," Power Engineering Vol. 92, No.4, pp. 56~58.
- (3) Landes, J.D. and Begley, J.A., 1976, "A Fracture Mechanics Approach to Creep Crack Growth," Mechanics of Crack Growth, ASTM STP 590, pp. 128~148.
- (4) Nikbin, K.M., Webster, G.A. and Turner C.E., 1976, "Relevance of Nonlinear Fracture Mechanics to Creep Cracking," Cracks and Fracture, ASTM STP 601, pp. 47~62.
- (5) Jaske, C.E., 1987, "Long-Term-Creep and Creep-Crack Growth Behavior of 9Cr-1Mo-V-Nb Steel," ASM Conference, Chicago.
- (6) Haigh, J.R., 1975, "The Mechanisms of Microscopic High Temperature Crack Growth, I, Experiments on Tempered Cr-Mo-V Steels," Mater. Sci. Eng. 20, pp. 213~223.
- (7) Smith, D.J. and Webster, G.A., 1983, "Estimation of the C\* Parameter for Crack Growth in Creeping Materials," Elastic-Plastic Fracture, ASTM STP 803, pp. 654~674.
- (8) Yokobori, A.T. Jr., Yokobori, T., Kuriyama, T., Kato, T. and Kaji, Y., 1986, "Characterization of High Temperature Crack Growth Rate in Terms of Independent

- Parameters," International Conference on Creep, April, Tokyo.
- (9) Ohji, K. and Kubo, S., 1988, "Fracture Mechanics Evaluation of Crack Growth Behavior under Creep and Creep-Fatigue Conditions," Current Japanese Materials Research Vol.3, pp. 91~113.
- (10) Brust, F.W. and Atluri, S.N., 1986, "Studies on Creep Crack Growth Using the  $T^*$ -Integral," Engineering Fracture Mechanics Vol. 23, No. 3, pp. 551~574.
- (11) Saxena, A., 1980, "Evaluation of  $C^*$  for the Characterization of Creep Crack Growth Behavior of 304SS, ASTM STP 700, pp. 131~151.
- (12) Saxena, A., Shih, T.T. and Ernst, H.A., 1984, "Wide Range Creep Crack Growth Rate Behavior of A470 Class 8 Steel, ASTM STP 833, pp. 516~531.
- (13) Goldman, N.L. and Hutchinson J.W., 1975, "Fully Plastic Crack Problems : the Center-Cracked Strip under Plane Strain," International Journal of Solids and Structures, Vol. 11, pp. 575~591.
- (14) Shih, C.F., 1983, "Tables of Hutchinson-Rice-Rosengren Singular Field Quantities," Materials Research Lab., Brown University, MRL E-147.
- (15) Bassani, J.L. and McClintock, F.A., 1981, "Creep Relaxation of Stress around a Crack Tip," International Journal of Solids and Structures, Vol. 7, pp. 479~492.
- (16) Riedel, H. and Rice, J.R., 1980, "Tensile Cracks in Creeping Solids," Fracture Mechanics : 12th Conference, ASTM STP 700, pp. 112~130.
- (17) Ohji, K., Ogura, K. and Kubo, S., 1979, "Stress-Strain Field and Modified J-Integral in the Vicinity of Crack Tip under Transient Creep Conditions," JSME 790-13, pp. 18~20.
- (18) Saxena, A., 1981, "Creep Crack Growth under Non-Steady State Conditions," Fracture Mechanics : 17th Symposium, ASTM STP 905, pp. 185~201.
- (19) Saxena, A., Han, J. and Banerji, K., 1988, "Creep Crack Growth Behavior in Power Plant Boiler and Steam Pipe Steels," Journal of Pressure Vessel Technology, Vol. 110, pp. 137~146.
- (20) Riedel, H. and Detampel, V., 1987, "Creep Crack Growth in Ductile, Creep Resistant Steels," International Journal of Fracture, Vol. 33, pp. 239~262.
- (21) Kuhnle, V. and Riedel, H., 1987, "Time-Dependent Deformation and Fracture of Steel between 20°C and 400°C, International Journal of Fracture, Vol. 34 pp. 179~194.
- (22) Saxena, A. and Liaw, P.K., 1986, "Remaining Life Estimation of Boiler Pressure Parts-Crack Growth Studies," EPRI CS-4688, Project 2253-7, Final Report.
- (23) Kino, H., 1985, "Electric Potential Technique for Monitoring Crack Growth and Creep Crack Growth Behavior in Various Steel," Mitsubishi Heavy Industries, Ltd.
- (24) 1990, "Standard Test Method for Measurement of Creep Crack Growth Rates in Metals," Draft Prepared by VAMAS Group and ASTM Task Group E24.04.08 and E24.08.07.
- (25) Bassani, J.L., Hawk, D.E. and Saxena, A., 1986, "Evaluation of the  $C_t$  Parameter for Characterizing Creep Crack Growth Rate in the Transient Regime," Nonlinear Fracture Mechanics : Vol.1.-Time Dependent Fracture, ASTM STP 995, pp. 7~26.
- (26) Leung, C.P., McDowell, D.L. and Saxena, A., 1986, "A Numerical Study of Nonlinear State Creep at Stationary Crack Tip," *ibid* pp. 55~67.

- (27) Kumar, V., German, M.D. and Shih, C.F., 1981, "An Engineering Approach to Elastic-Plastic Fracture Analysis," EPRI NP 1931, Electric Power Research Institute.
- (28) Tada, H., Paris, P. and Irwin G.R., 1973, "The Stress Analysis of Cracks Handbook," Del Research Co., Heller Town, PA.
- (29) Leung, C.P., McDoell, D.L. and Saxena, A., 1988, "Consideration of Primary Creep at Stationary Crack Tips : Implication for the  $C_t$  Parameter," International Journal of Fracture, Vol. 36, No.4, pp. 275~289.
- (30) Yoon, K.B., Saxena, A. and McDowell, D. L., 1991, "Influence of Crack Tip Cyclic Plasticity on Creep-Fatigue Crack Growth," ASTM STP.(to be published) 